

Seismiske undersøgelser af Solen og andre stjerner

Jørgen Christensen-Dalsgaard, *Stellar Astrophysics Centre, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet*

Observation af stjernessvingninger kan give information om stjernernes egenskaber, herunder deres indre opbygning og rotation. I de seneste årtier har sådanne helioseismiske studier givet detaljeret viden om Solen og dermed en bedre forståelse af stjerners struktur og udvikling. Takket være især NASAs Kepler-satellit har vi været i stand til foretage tilsvarende asteroseismiske undersøgelser af mange andre stjerner, herunder eksempler på, hvordan Solen vil udvikle sig over de kommende mange milliarder af år.

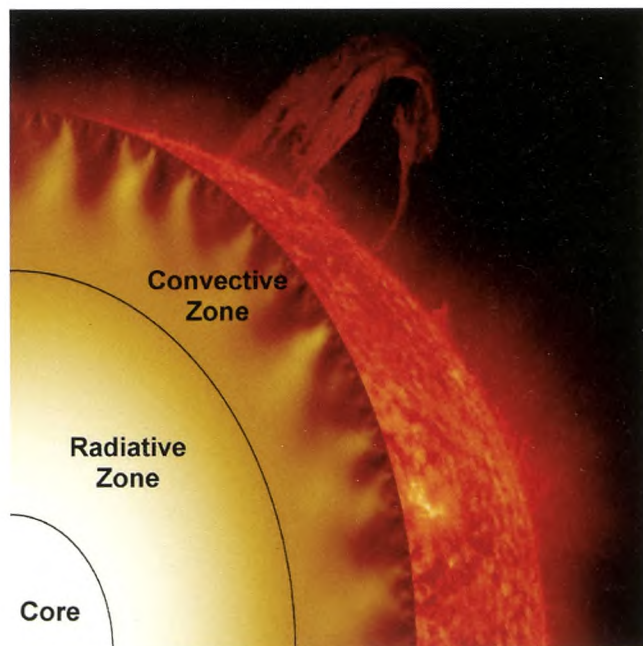
Stjerner er de basale byggesten for strukturen af universet og er på mange måder afgørende for universets udvikling. Alle grundstoffer tungere end litium produceres ved kernereaktioner i stjernernes indre, og eksplosive processer ved afslutningen af tunge stjerners liv er i høj grad med til at forme strukturen af galakser. Observationer af stjerner er afgørende for studiet af galaksers udvikling, inklusive vores egen galakse Mælkevejen. For at studere planeter omkring andre stjerner, de såkaldte exoplaneter, må vi bestemme egenskaberne ved de stjerner, de kredser omkring, og det gør det bl.a. muligt at bestemme alderen af disse planetsystemer.

Vi kan foretage observationer af stjerners overfladeegenskaber inklusive grundstofsammensætning og temperatur. Hvis vi kender afstanden til en stjerne, kan vi også bestemme stjernens samlede energiudsendelse, den såkaldte lysstyrke – i specielle tilfælde også stjernens radius – og for nogle stjerner, der kredser om hinanden i et dobbeltstjernesystem, kan også stjernernes masse bestemmes. Mere detaljeret information fås for stjerner, der er samlet i stjernehober, hvor alle stjerner kan antages at have samme alder og oprindelige grundstofsammensætning. Men alle disse observationer giver ikke direkte information om forholdene i stjernernes indre.

Vores viden om stjernernes indre struktur og deres livshistorie har i høj grad været baseret på teoretiske modeller. De involverer numerisk løsning af ligninger for betingelsen for ligevægt mellem trykgradienten og tyngdekraften, for energiproduktionen i stjernens dybe indre og energitransporten fra de centrale dele til overfladen, suppleret med en beskrivelse af stoffets egenskaber i stjernen og de kernereaktioner, der producerer energien. I stjerner som Solen produceres energien ved fusion af fire brintkerner til en heliumkerne. Ved denne proces ændres sammensætningen af stjernens indre, og det driver en gradvis udvikling af stjernen. Figur 1 viser en skematisk illustration af strukturen af Solens indre.

Med en alder på 4,6 milliarder år, bestemt ud fra radioaktivt henfald af grundstoffer i meteoritter, viser modellerne, at Solen er ca. halvvejs gennem den fase af udviklingen, hvor brintfusionen sker i de centrale dele. Om fem milliarder år er brinten brugt op i Solens centrum; Solen har herefter en heliumkerne omgivet af et område, en såkaldt skalkilde, hvor der stadig sker brintfusion. Denne proces øger massen af heliumkernen, som trækker sig sammen under den forøgede vægt. Modellerne viser, at de ydre lag af stjernen udvider

sig, til sidst så voldsomt, at stjernen bliver en rød kæmpestjerne; i Solens tilfælde måske så stor, at den vil opsluge Jorden, og med en lysstyrke tusind gange den nuværende. Som led i denne udvikling når temperaturen i det indre af heliumkernen et niveau, hvor helium begynder at fusionere til kulstof og ilt. I afslutningen af Solens udvikling vil der ske et voldsomt massetab, hvor de ydre lag afstødes og kortvarigt danner en såkaldt planetarisk tåge omkring den centrale kerne, der nu består overvejende af kulstof og ilt. Sådanne kerner, der observeres som meget kompakte, hvide dværgstjerner med masser på ca. halvdelen af Solens masse og radier sammenlignelige med Jordens radius, har i begyndelsen overfladetemperaturer over 100.000 grader og afkøles gradvist over milliarder af år.



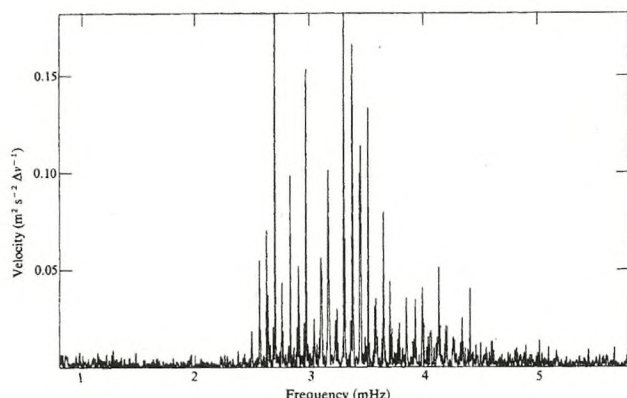
Figur 1. Skematisk illustration af strukturen af Solen og solnigende stjerner. I de centrale dele produceres energi ved fusion af brint til helium. Energien transporteres udad af stråling i de indre ca. 70 procent af Solen. I de ydre dele sker energitransporten ved konvektion, hvor varm gas stiger til vejrs, og kold gas synker indad.

Denne beskrivelse af Solens og andre stjerners udvikling er overvejende baseret på numeriske modeller. Den giver en rimelig fortolkning af observationer af stjerner, ikke mindst deres fordeling efter lysstyrke og overfladetemperatur i stjernehober, men den rummer mange usikre detaljer, som ikke kan tjekkes alene med

observationer af stjernernes overfladeegenskaber. Det kræver mere dybtgående observationer. I de seneste årtier har studier af stjernessvingninger givet sådanne observationer, først for Solen og navnlig i det seneste årti for andre stjerner [1].

Stjernessvingninger

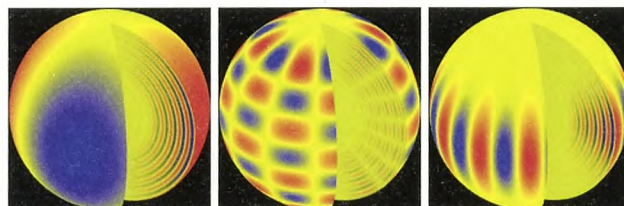
Variable stjerner har været kendt i århundreder. Den mest kendte type er nok de såkaldte Cepheider [2], opkaldt efter stjernen δ Cephei, hvis regelmæssige variationer med en periode på 5,4 døgn nemt kan observeres med det blotte øje. Cepheidernes periode er direkte relateret til deres lysstyrke, og det har gjort dem til værdifulde "fyrtårne" i karakteriseringen af universets struktur. I 1960'erne blev det klart, at Solens overflade også udviste periodiske variationer i hastighed med en periode på ca. 5 minutter, og i det efterfølgende tiår blev det vist, at disse skyldtes stående lydbølger, der i nogle tilfælde omfatter hele Solen. Amplituden er mindre end 20 cm/s for de individuelle svingninger, så opdagelsen af dem er en teknologisk triumf. De første detaljerede observationer blev foretaget fra Sydpolen i (den nordlige) vinter 1979–80 af en fransk-amerikansk gruppe (se figur 2). De observerede Solen uafbrudt i mere end 5 døgn og kunne derfor adskille de enkelte svingninger.



Figur 2. Svingningsspektrum for Solen, observeret i Dopplerhastighed i perioden 31. december 1979 – 5. december 1980, med udstyr placeret ca. 8 km fra den geografiske Sydpol. Figuren viser svingningsintensiteten som funktion af frekvensen, i millihertz. Svingningerne har maksimal amplitude ved en frekvens omkring 3 mHz, svarende til en periode på ca. 5 minutter. Hver top i spektret svarer til en egensvingning af Solen, med en frekvens der afhænger på en specifik måde af forholdene i Solens indre.

Cepheidernes svingninger er kuglesymmetriske, hvor stjernen skiftevis udvider sig og trækker sig sammen. I Solen og mange andre stjerner er der et meget rigere spektrum af svingninger. For at beskrive svingninger af et tredimensionelt objekt har vi brug for tre "bølgetal". Det ene af dem er den radiale orden n , der beskriver antallet af knuder i den radiale retning, dvs. kugleskaller hvor svingningsamplituden er nul, helt analogt til en svingende streng. De to andre bølgetal beskriver svingningernes variation hen over stjernens overflade (se figur 3). Matematisk er de givet ved de såkaldte kuglefunktioner, som også kendes fra den kvantemekaniske beskrivelse af atomer. De er karakteriseret ved graden l , som angiver det totale antal

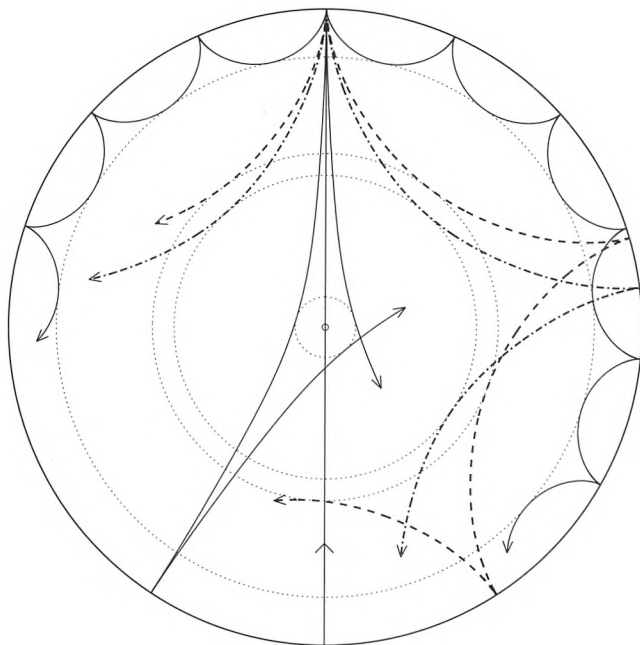
knudelinier på stjernens overflade, og antallet m (den azimutale orden) af knudelinier, der krydser ækvator. For de kuglesymmetriske (også kaldt "radiale") svingninger er $l = 0$. Observationerne på figur 2 omfatter svingninger med $l = 0 - 3$ og en radial orden mellem ca. 15 og 30. Det er typisk for svingninger observeret i mange andre stjerner, hvor stjernernes overflade ikke kan opløses. I Solens tilfælde kan vi tage "billeder" af hastighedsfeltet på Solens overflade og på den måde observere svingninger med grader op til mere end 1000.



Figur 3. Såkaldte kuglefunktioner, der beskriver opførslen hen over stjernens overflade af svingninger af en stjerne. De er karakteriseret af graden l , der giver det samlede antal knudelinier på stjernens overflade, og ordenen m , der måler antallet af knudelinier, der krydser ækvator. De viste svingninger har $(l, m) = (2, 2), (12, 6)$ og $(12, 12)$. Observationer af fjerne stjerner i lys, midlet over stjernens overflade, er kun følsomme over for svingninger med $l \leq 3$; for højere l vil områder med positive og negative udsving udslukke hinanden. På Solen kan vi observere svingninger med høje l gennem observationer, der opløser solskiven. I udsnittet af stjernen er også skitseret svingningernes opførsel i det indre af stjernen, karakteriseret ved den radiale orden n . Bemærk også, at svingningen til højre med $m = l$ er mere koncentreret mod ækvator.

Som i geofysikken kan svingningernes egenskaber illustreres ved opførslen af stråler, der følger bølgenes udbredelse. Det er vist på figur 4 for lydbølger i en stjerne. De radiale svingninger svarer til bølger, der udbreder sig radiale og når helt ind til stjernens centrum. Med voksende grad l bliver bølgerne afbøjet længere og længere ude i stjernen. Svingninger af lave grader, som også kan observeres i andre stjerner end Solen, giver altså, lidt overraskende, information om forholdene i stjernens centrale dele. I Solen gør observation af svingninger af grader fra 0 til flere hundrede, der udbreder sig i meget forskellige områder i Solen, det muligt at bestemme Solens egenskaber som funktion af positionen i det meste af Solens indre; som illustreret på figur 3 afhænger kuglefunktionernes udbredelse i breddegrad af m på en måde, som gør det muligt at opløse variationen i fx Solens rotation med bredden.

Ethvert objekt har et sæt egensvingninger, men for at kunne observeres, må svingningerne holdes i gang. I Solen og sol lignende stjerner er svingningerne dæmpet og ville dø ud, hvis de ikke hele tiden blev exciteret. Excitationen skyldes støj fra de voldsomme konvektive gasbevægelser i den såkaldte granulation, der bringer energien ud til stjerneoverfladen. Ydre konvektion findes i alle stjerner med en overfladetemperatur under ca. 7000 grader, og vi ville altså forvente sol lignende svingninger i disse stjerner; som vi skal se, er det blevet bekræftet af observationer fra Kepler-satellitten.



Figur 4. Kurver, der markerer udbredelsen af lydbølger i det indre af en stjerne, vist i et tværsnit af stjernen. Bølgerne exciteres af den turbulente konvektion nær stjernens overflade. Når de bevæger sig ind i stjernen, bliver de afbøjet af den stigende lydhastighed med dybden under stjernens overflade, indtil de når det indre vendepunkt, markeret ved prikkede cirkler, hvor de undergår total indre refleksion. Når bølgen når tilbage til stjernens overflade, bliver den reflekteret af det kraftige fald i den lokale massefylde. Bølger svarende til høje værdier af l afbøjes først: de viste kurver svarer til $l = 75, 25, 20$ og 2 . Radiale svingninger, med $l = 0$, er skematisk indikeret med en linie gennem stjernens centrum. For Solen har vi observationer for alle grader op til flere hundrede. Ved at kombinere data for svingninger med forskellige positioner af vendepunktet kan strukturen, specielt lydhastigheden, i Solens indre bestemmes.

Stjernesvingninger kan observeres ved at måle en stjernes overfladehastighed ved hjælp af Dopplereffekten, eller ved at måle variationer i lysstyrken. En udfordring for studiet af sollignende svingninger er, at denne form for excitation resulterer i meget små amplituder. For stjerner med central brintfusion, inklusive Solen, er typiske hastighedsamplituder maksimalt 10–20 cm/s, mens svingningerne i lysstyrken kun er nogle få milliontedele. Svingningerne i radialhastigheden kan måles med jordbaserede teleskoper, mens lysstyrkevariationerne set fra Jorden drukner i fluktuationer, der skyldes Jordens atmosfære; her er observationer fra rummet nødvendige.

Helioseismologi

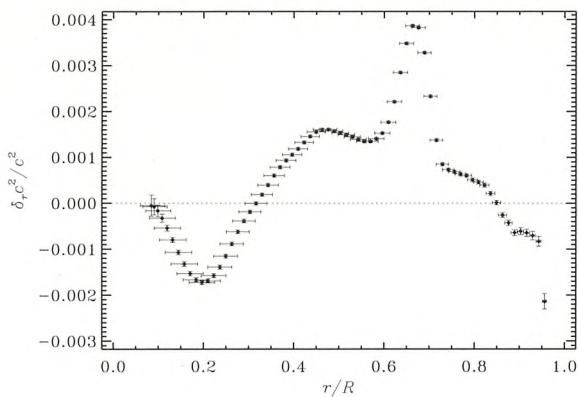
De første detaljerede observationer af solsvingninger, fx som vist i figur 2, demonstrerede det store potentiale for studier af Solens indre og førte til udviklingen af meget avancerede instrumenter. For at opnå den fulde mulige nøjagtighed og undgå komplikationer i dataanalysen er det nødvendigt at have meget lange og stort set ubrudte observationsserier, gerne over mange måneder eller år. Bortset fra områder nær polerne indebærer observationer af Solen fra Jordens overflade med et enkelt teleskop uundgåelige natlige afbrydelser; uafbrudte observationer (bortset fra problemer med vejret) kan opnås ved at kombinere data fra flere ob-

servatorier. Det er udnyttet i to omfattende netværker af teleskoper, der har været i funktion siden halvfemserne. Den anden mulighed er at observere fra rummet, og den er udnyttet i SOHO-satellitten, et fælles projekt til observation af fænomener på Solen mellem ESA og NASA. Satellitten blev opsendt i 1995 og er stadig i funktion. Figur 5 viser et "hastighedsbillede" optaget med MDI-instrumentet på SOHO; farveskalaen angiver størrelsen af den målte radialhastighed. Instrumentet optog et billede hvert minut over en periode på 15 år. Med en opløsning på 700.000 pixler svarer disse målinger af "solskælv" effektivt til at placere 700.000 seismografer på Solens overflade. MDI blev i 2011 erstattet af HMI-instrumentet på NASAs SDO-satellit, med en endnu højere opløsning.



Figur 5. Illustration af en måling af radialhastigheden af Solens overflade med MDI-instrumentet på SOHO-satellitten. Farveskalaen viser hastigheden i satellittens retning. Variationen er domineret af Solens rotation, med en overfladehastighed på ca. 2 km/s ved Solens ækvator. De øvrige variationer skyldes konvektion og den kombinerede effekt af over hundrede tusinde egensvingninger. Ved at analysere sådanne målinger optaget hvert minut over flere måneder kan de enkelte svingninger adskilles, og deres frekvenser bestemmes.

Analysen af disse meget omfattende data kaldes "helioseismologi" efter det græske ord "helios" for Solen. De analyseteknikker, der bruges, er i høj grad en videreudvikling af geofysiske teknikker. Studier af Solens indre struktur sigter generelt mod at teste de teoretiske modeller af Solen; da der er tale om lydbølger, er det specielt lydhastigheden i Solens indre, der kan bestemmes. Som eksempel viser figur 6 forskellen mellem lydhastigheden i Solens indre og i en solmodel. Der er vist usikkerheder på bestemmelsen af forskellen, men de er i meget af Solen mindre end størrelsen af symbolerne. Det er ganske slående, at teoretiske modeller, baseret på den fysik, vi har udviklet på grundlag af laboratorieforsøg og teori, er i stand til at forudsige forholdene i det indre af en stjerne med så stor nøjagtighed.



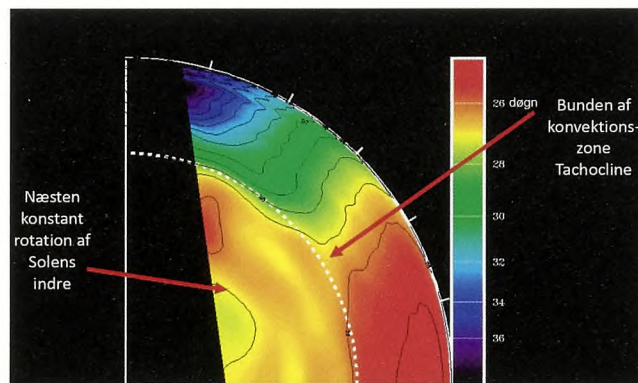
Figur 6. Relativ forskel i lydhastighedens kvadrat c^2 mellem Solen og en solmodel, bestemt ved analyse af helioseismiske data. Hvert punkt svarer til et gennemsnit af forskellen, over et område markeret ved de vandrette usikkerhedsbjælker. De lodrette usikkerhedsbjælker (der er næsten usynlige for en stor del af punkterne) markerer usikkerheden i bestemmelsen af forskellen, baseret på usikkerhederne i de målte frekvenser.

Lydhastigheden af den gas, som Solen består af, afhænger af temperaturen og grundstofsammensætningen. Ved at bestemme lydhastigheden i Solen får man derfor information om temperaturen i Solens indre. Tidligt i udviklingen af helioseismologien var det vigtigt ved at bekræfte at de gængse solmodeller var stort set korrekte. Brintfusionen i Solens indre frigør en strøm af neutrinoer, og på det tidspunkt var en kraftig uoverensstemmelse mellem den forudsagte og målte flux af neutrinoer fra Solen et tegn på alvorlige problemer med forståelsen af Solens indre. De helioseismiske resultater gjorde det usandsynligt, at årsagen skulle findes i fejl i solmodellerne, men snarere i ændringer i neutrinoernes egenskaber, fra deres dannelse til deres detektion. Det er senere blevet direkte bekræftet af nye neutrinomålinger.

Efter at modellen illustreret på figur 6 blev beregnet, har forbedrede analyser af Solens atmosfære ført til en revision af vores viden om Solens grundstofsammensætning. Modeller beregnet med den nye grundstofsammensætning afviger væsentlig mere fra Solens struktur, bestemt med helioseismologi, end modellen på figur 6. Årsagen til denne afvigelse er ikke kendt, men det er sandsynligt, at den er relateret til problemer med vores beskrivelse af, hvordan stof og stråling vekselvirker i Solens indre. Nye målinger og beregninger af denne vekselvirkning er på vej og kan forhåbentlig give os en bedre forståelse af fysikken i Solens indre.

Observationer af solsvingninger kan også bruges til at bestemme Solens indre rotation. Rotationen af Solens overflade er direkte bestemt ud fra observationer, fx af radialhastigheden som vist på figur 5. Den viser, at rotationen ikke er den samme overalt: Solens ækvator roterer med en periode på ca. 25 døgn, mens rotationsperioden nær Solens poler er mere end 30 døgn. Figur 7 viser Solens indre rotation, bestemt ud fra analyse af svingningsobservationer. De ydre ca. 27 procent af Solen roterer nogenlunde som overfladen, med en variation fra ækvator mod polerne. Under dette område er der en relativt skarp overgang til næsten konstant rotation, som fortsætter så dybt, som observationerne

rækker. Årsagen til dette rotationsmønster er ikke forstået til bunds. Det har tidligere været foreslået, at Solen havde en hurtigt roterende kerne, som forårsagede en let modifikation af Solens tyngdefelt, og dermed påvirkede en vigtig test af Einsteins generelle relativitetsteori ud fra målinger af planeten Merkurs bane. De helioseismiske resultater viser helt klart, at dette ikke er tilfældet; Merkurs bane er i fuldstændig overensstemmelse med Einsteins teori.



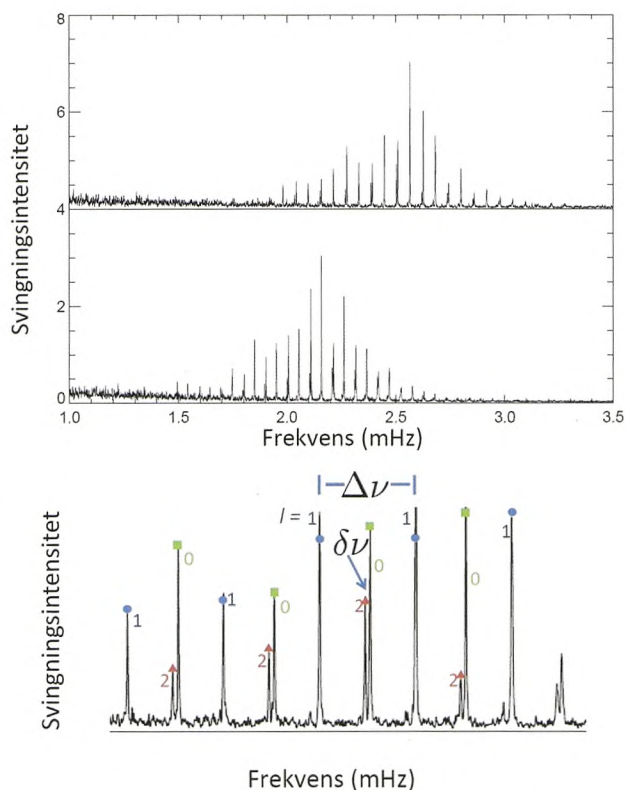
Figur 7. Solens indre rotation, bestemt ved analyse af helioseismiske data, i en kvadrant af et tværsnit af Solen, med rotationsaksen lodret og ækvator vandret. Farveskalaen markerer rotationsperioden i døgn. Den stiplede cirkel viser bunden af konvektionszonen, hvor der er en overgang mellem energitransport ved stråling og konvektion (se figur 1). Nær rotationsaksen og i de centrale dele af Solen har vi ikke tilstrækkelig information til at måle rotation.

Keplers revolution

De meget små amplituder af sollignende svingninger er en stor udfordring for at detektere dem. Efter mange forsøg over mere end ti år blev den første nogenlunde sikre bestemmelse af et sollignende svingningsspektrum i en anden stjerne foretaget i 1994 med det Nordiske Optiske Teleskop på La Palma. I de følgende 15 år blev der foretaget adskillige observationer af svingninger i radialhastigheder med jordbaserede teleskoper, inklusive observationer af Alfa Centauri A, en af himlens klareste stjerner, med et af verdens største teleskoper, ESOs Very Large Telescope.

Det store gennembrud for asteroiseismologi, dvs. studiet af stjernernes egenskaber ud fra observation af deres svingninger, kom med NASAs opsendelse af Kepler-teleskopet i 2009 [3]. Hovedformålet med Kepler var detektion af planeter i bane om andre stjerner, de såkaldte exoplaneter, ved hjælp af passageteknikken. Her observerer man den lille reduktion af en stjernes lysstyrke, hvis en planet passerer hen forbi den, set fra teleskopet; for en planet som Jorden, der passerer forbi en stjerne som Solen, er effekten af størrelsesordenen en titusindedel [4]. Det kræver uhyre nøjagtige målinger af stjernernes lysstyrke. For at sikre, at effekten skyldes en planet i bane om stjernen, kræves uafbrudte observationer over meget lange tidsrum, og da kun få af de mulige planeter har baner, hvor der rent faktisk sker en passage, skal der observeres et meget stort antal stjerner. Kepler-missionen blev udviklet for at tilfredsstille disse krav og var en meget stor succes. På grundlag af missionens resultater kan man konkludere, at næsten alle stjerner

i Mælkevejen har planetsystemer, mange med planeter af nogenlunde Jordens størrelse og i baner, hvor der i princippet er mulighed for flydende vand.



Figur 8. Svingningsspektre (se figur 2) for 16 Cygni A (øverst) og B (i midten), i omløb om hinanden i et dobbeltstjernesystem. Det nederste panel illustrerer den detaljerede struktur i et udsnit af spektret for 16 Cygni A (se også ligning (1)). Her er graden l vist ved hver top, og markeret med grønne kvadrater (for $l = 0$), blå cirkler ($l = 1$) og røde trekanten ($l = 2$).

Kravene til planetobservationer svarer nøje til kravene til observationer af stjernesvingninger: meget lange, ubrudte observationer med stor nøjagtighed. Kepler observerede samme felt i stjernebillederne Lyren og Svanen i fire år og har givet os helt enestående data for astero-seismologi. Et eksempel er vist på figur 8, for dobbeltstjernesystemet 16 Cygni i stjernebilledet Svanen. Sammenligning med figur 2 viser, at svingningsfrekvenserne for disse stjerner er lidt lavere end for Solen, svarende til, at stjernerne er lidt større, med A-komponenten størst. Kvaliteten af data er på højde med tilsvarende observationer af Solen, og detaljeret analyse og sammenligning med modeller har givet en nøjagtig bestemmelse af stjernernes masser og radier, samt af alderen af systemet på 7 milliarder år, noget ældre end Solens 4,6 milliarder år. Næste skridt er en mere indgående sammenligning med stjernemodellerne for at se, hvor de skal forbedres.

Både figur 2 og figur 8 viser den karakteristiske struktur for akustiske svingninger af sol lignende stjerner. Deres frekvenser er approksimativt givet ved

$$\nu_{nl} \approx \Delta\nu \left(n + \frac{l}{2} + \epsilon \right) + d_{nl}, \quad (1)$$

hvor den store frekvensadskillelse $\Delta\nu = \nu_{n+1l} - \nu_{nl}$ varierer som kvadratroden af stjernens middelmassefylde;

d_{nl} er en lille korrektion, der kan bestemmes fra den lille frekvensadskillelse $\delta\nu = \nu_{nl} - \nu_{n-1l+2}$. Denne struktur viser sig i svingningsspektrene som en serie af næsten uniformt adskilte toppe med en finstruktur, der er illustreret nederst i figur 8. Bemærk også (jf. figur 4), at banerne for de bølger, der svarer til svingninger med $l = 0$ og 2, kun afviger væsentligt fra hinanden nær stjernens centrum. Det betyder, at $\delta\nu$ er specielt følsom over for forholdene i de centrale dele af stjernen, herunder hvor meget brint, der er fusioneret til helium og dermed stjernens alder.

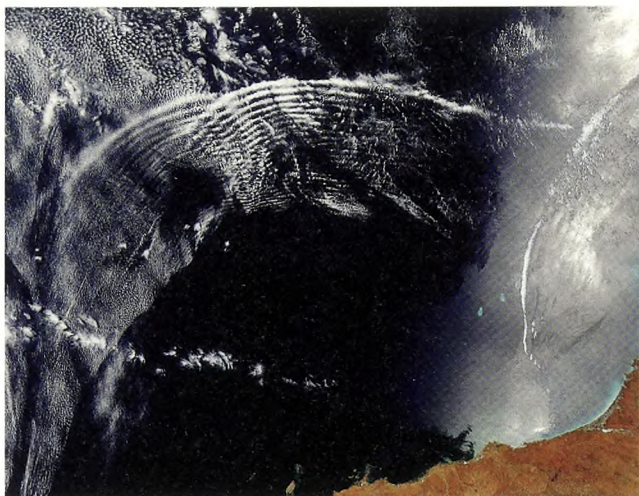
Kepler har givet os observationer af sol lignende svingninger i hundredevis af stjerner i eller lige efter den centrale brintfusionsfase. Et specielt interessant udvalg af stjerner er dem, hvor Keplers observationer samtidig har vist forekomsten af exoplaneter. Her giver de astero-seismisk bestemte masser og radier af stjernerne en tilsvarende nøjagtig bestemmelse af planeternes egenskaber, og specielt er bestemmelsen af stjernernes, og dermed planetsystemernes, aldre meget vigtige for at forstå dannelsen og udviklingen af planetsystemer. Kepler har fundet planetsystemer med aldre omkring 10 milliarder år, dobbelt så gamle som Solen. Det viser, at planetdannelse fandt sted allerede i de tidlige faser af Mælkevejens historie.

Røde kæmpestjerner

De fleste af Keplers målinger skete med en såkaldt kadence på 30 minutter, hvor lysstyrken blev integreret over 30 minutter i hver måling. Et udvalg på 500 stjerner blev observeret med en kadence på et minut, og det er en forudsætning for, at svingninger med periode på nogle få minutter, karakteristisk for Solen og sol lignende stjerner, kan observeres. Større stjerner svinger med længere perioder, og specielt har Keplers observationer med 30-minutters kadence givet astero-seismiske data for titusindvis af røde kæmpestjerner. Som for sol lignende stjerner giver disse data en bestemmelse af stjernernes masse og radius, og fra modeller kan stjernernes aldre også bestemmes. Disse resultater er meget værdifulde i karakteriseringen af Mælkevejens udviklingshistorie, i hvad der er blevet kaldt galaktisk arkæologi, og dermed et vigtigt bidrag til den generelle forståelse af, hvordan galakser dannes og udvikler sig.

Men de røde kæmpestjerner gemmer på andre hemmeligheder, som er blevet afsløret af Keplers astero-seismiske data. Ud over lydbølger, som dominerer de svingninger, vi ser i Solen og sol lignende stjerner, har stjerner indre tyngdebølger. De svarer til bølger på en vandoverflade, men kan forekomme overalt, hvor der er en gradient i massefylden, og de skyldes tyngdekraftens effekt på variationer i massefylden. (Bemærk, at de er et helt andet fænomen end *gravitationsbølger*, som er bølger i selve rummets struktur – se [5].) I Jordens atmosfære kan de undertiden ses afspejlet i skymønstre (se figur 9). I Solen og sol lignende stjerner er frekvensen af de tilsvarende stående bølger for lav til, at de har kunnet identificeres. Røde kæmpestjerner har derimod, som nævnt ovenfor, en meget kompakt heliumkerne, og her er den lokale tyngdeacceleration så høj, at frekvensen af tyngdebølgerne bliver sammen-

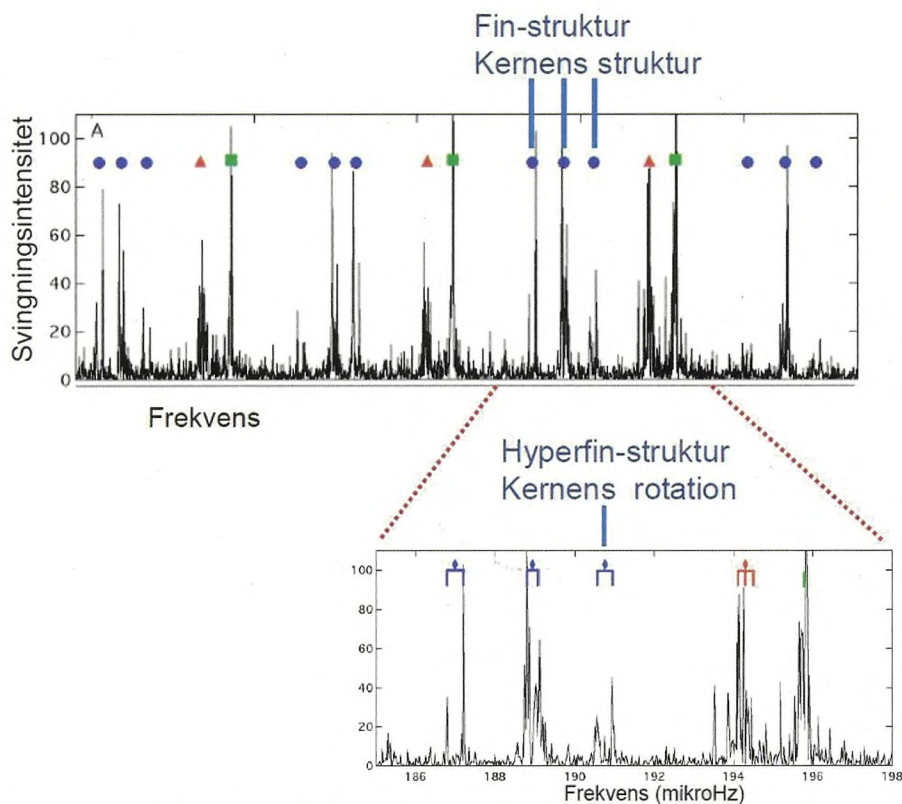
lignelig med frekvensen af de solignende svingninger, exciteret af turbulensen i stjernens ydre lag. Resultatet er, at svingningerne får en blandet karakter, hvor de opfører sig som lydbølger i de ydre dele af stjernen og som tyngdebølger i stjernens centrale område. Det er afspejlet i det observerede frekvensspektrum gennem forekomsten af ekstra toppe (se figur 10), hvis frekvenser direkte afhænger af forholdene i stjernens dybe indre og dermed giver os en enestående mulighed for at undersøge disse områder.



Figur 9. Interne tyngdebølger i Jordens atmosfære, markeret af skybåndene i venstre side af billedet. Billedet er taget af NASAs TERRA-satellit, over det Indiske Ocean, med lidt af Australien i billedets nederste højre hjørne.

Som nævnt i afsnit 1 kan røde kæmpestjerner enten få deres energi fra brintfusion i en skalkilde omkring en passiv heliumkerne eller fra en kombination af skalkilden og heliumfusion i de centrale dele af heliumkernen. Stjerner i disse fysisk set meget forskellige faser kan have overfladeegenskaber, der er meget vanskelige at skelne fra hinanden. Det mest slående resultat af Keplers studier af røde kæmpestjerner er, at observation af frekvenserne af tyngdebølger meget tydeligt adskiller disse to typer af stjerner. Vi kan altså her undersøge, hvad der foregår inde i en meget lille heliumkerne midt i en stjerne, der er 10 gange så stor som Solen! En nærmere analyse af disse data vil give os en meget bedre forståelse af de sene udviklingsstadier af solignende stjerner, inklusive hvad der i fremtiden venter Solen.

Ligesom for Solen kan svingningsfrekvenserne også bruges til at studere den indre rotation af de røde kæmpestjerner; som vist på figur 10 giver rotationen en opsplitning af frekvenserne, som afhænger af rotationshastigheden. Her viser resultaterne, at rotationen langt fra er den samme overalt i stjernerne: heliumkernen roterer typisk mere end ti gange så hurtigt som stjernens overflade. Faktisk ville man ud fra modellerne forvente en endnu hurtigere rotation af kernen. Som nævnt har kernen trukket sig voldsomt sammen under sin egen tyngdekraft i løbet af udviklingen fra et stadium som Solens til det røde kæmpe stadium. Hvis det angulære moment af kernen havde været bevaret, ville sammen-



Figur 10. Udsnit af svingningsspektrum for en rød kæmpestjerne. Som i figur 8 er graden l markeret med grønne kvadrater ($l = 0$), blå cirkler ($l = 1$) og røde trekanter ($l = 2$), men i modsætning til 16 Cygni A er der nu tre toppe med $l = 1$ mellem hvert par af toppe med $l = 0$ og 2. Det afspejler koblingen mellem den akustiske opførsel i de ydre dele af stjernen og de interne tyngdebølger i stjernens centrale dele, hvis egenskaber bestemmer frekvensforskellene mellem toppene med $l = 1$. Frekvenserne går fra ca. 0,160 til 0,210 mHz i det øverste panel. Det nederste panel viser opsplitningen af toppene for $l = 1$ (og i et enkelt tilfælde $l = 2$), der skyldes stjernens rotation.

trækningen have fået kernen til at rotere med perioder på nogle få timer, på samme måde som en skøjteløber roterer hurtigere ved at trække armene ind til siden. Den relativt "langsomme" rotation af kernen viser derfor, at der må være processer, der transporterer angulært moment ud af kernen. Hvordan disse processer fungerer, ved vi stadig ikke.

Fremtiden på Jorden og i rummet

Helio- og asteroseismologi har givet os banebrydende ny viden om Solens og stjerners egenskaber og om de fysiske processer, der ligger bag. Som altid i videnskab har den nye viden rejst nye og mere dybtgående spørgsmål. Vi er slet ikke færdige med at observere Solen og stjernerne og analysere de resulterende data, inklusive meget omfattende data fra Kepler, der her efter missionens afslutning endnu langt fra er udnyttet til bunds. Og nye data er på vej. NASA opsendte i april 2018 satellitten TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Som for Kepler er formålet at lede efter exoplaneter med passageteknikken, men TESS skal observere felter over det meste af himlen og fokusere på relativt nære og klare stjerner, som parallelt kan observeres i større detalje med andre teknikker. Til gengæld vil de fleste felter kun blive observeret i fire uger, hvilket begrænser omløbstiden for de planeter, der kan studeres. Som Kepler vil TESS også levere glimrende asteroseismiske data, igen med vægt på at karakterisere stjerner, der huser planetsystemer. Aarhus Universitet har en vigtig rolle i både Kepler og TESS gennem at organisere internationale konsortier med ansvar for de asteroseismiske undersøgelser baseret på missionernes data. Samtidig har vi etableret databaser til at sikre adgang til disse data og deling af resultaterne af analysen. En kommende stor mission til exoplanetstudier og asteroseismologi er ESAs PLATO-mission med planlagt opsendelse i 2026, som også har betydelig dansk deltagelse.



Figur 11. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) er et rumobservatorium, der indgår i NASAs Explorers-program, der leder efter exoplaneter ved hjælp af transitmetoden i et område, der er 400 gange større end det område, der blev dækket af Kepler. TESS blev opsendt den 18. april 2018.

Aarhus Universitet leder også SONG-projektet (for Stellar Observations Network Group), der sigter mod at opstille et antal teleskoper med passende fordeling rundt om Jorden for at sikre lange og kontinuerte observationer for asteroseismologi og studier af exoplaneter [6]. Det første teleskop har været i drift på

Tenerife siden 2014. Det er fuldautomatisk og udfører observationerne uden indblanding af en observatør, givet en liste over prioriterede objekter. Sammen med internationale partnere er tilsvarende teleskoper under etablering i Kina og Australien, og det er håbet, gennem involvering af yderligere partnere, også at etablere teleskoper i Sydafrika, Sydamerika og USA. Der er en vigtig komplementaritet mellem de rum- og jordbaserede observationer. Observationer af stjernesvingninger i radialhastighed, som kan udføres med jordbaserede teleskoper, har en væsentlig højere kvalitet end lysstyrkeobservationerne fra Kepler og TESS, men til gengæld kan man kun observere én stjerne ad gangen. Desuden kræver fuld karakterisering af planeter fundet med passageteknikken opfølgende observationer af systemernes radialhastighed og andre egenskaber, som kan gennemføres fx med SONG-teleskoperne.

De seneste 40 år har set en dramatisk udvikling i vores muligheder for at undersøge Solens og stjernernes indre. Helio- og asteroseismologi er nu veludviklede teknikker, som fortsat vil være centrale i vores studier af stjerner og deres betydning for forståelsen af andre astrofysiske fænomener.

Litteratur

- [1] Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen, Frank Grundahl, Søren Frandsen, Pierre-Olivier Quirion (2009) "Helio- og astero-seismologi", *Kvant*, bind 20, nr. 2, side 29.
- [2] Michael Quaade (2016) "Nordstjernen – en spændende stjerne", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 20.
- [3] Lars Buchhave (2009) "Exoplaneter og Kepler-missionen", *Kvant*, bind 20, nr. 2, side 3.
- [4] Hans Kjeldsen (2010) "Exoplaneter fundet med Kepler og CoRoT", *Kvant*, bind 21, nr. 3, side 20.
- [5] Jens Olaf Pepke Pedersen og Michael Cramer Andersen (2016) "Tyngdebølger observeret for første gang", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 8.
- [6] Mads Fredslund Andersen, Ole J. Knudsen, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Frank Grundahl og Hans Kjeldsen (2016) "Tæt på stjernerne. SONG – robotteleskopet på Tenerife", *Aktuel Naturvidenskab*, december 2016, nr. 6, side 8–13.



Jørgen Christensen-Dalsgaard er professor i astrofysik ved Aarhus Universitet og leder af Danmarks Grundforskningsfonds Center for Stellar Astrofysik. Han er uddannet ved Aarhus Universitet og har en ph.d. fra University of Cambridge. Han har beskæftiget sig med helio- og astero-seismologi i mere end 40 år, i de senere år især på basis af data fra Kepler-satellitten.